

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij strojarstva – Proizvodno strojarstvo



ZAVRŠNI RAD

Student: Kristian Pavić

Mentor: dr.sc. Tanja Tomić, dipl.ing.stroj.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Trg J.J.Strossmayera 9
HR-47000, Karlovac, Croatia
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Strojarstvo

Usmjerenje: Proizvodno

Karlovac, 20.06.2018.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Kristian Pavić**

Naslov: **Lasersko zavarivanje**

Tehnologija laserom u današnje vrijeme ima sve veću zastupljenost zbog modernizacije tehnologije spajanja i rezanja te razvijanja novih materijala kao i zbog većih tolerancija na kvalitetu zavara. Područje primjene lasera je vrlo široko, a ovim radom obradit ću područje tehnologije spajanja materijala. Student će opisati postupak laserskog zavarivanja, njegove prednosti, nedostatke i ograničenja. Također, sagledat će financijski aspekt primjene lasera po pitanju njegove iskoristivosti.

Zadatak zadan:

20.06.2018

Rok predaje rada:

01.09.2018

Predviđeni datum obrane:

26.09.2018.

Mentor:

dr.sc. Tanja Tomić, dipl.ing.stroj.

Predsjednik Ispitnog
povjerenstva:

IZJAVA I ZAHVALA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentorici dr.sc.Tanji Tomić na pomoći i savjetima tijekom izrade rada.

Od srca zahvaljujem svojoj obitelji na razumijevanju i pruženoj potpori tijekom studiranja.

Sadržaj

Izjava i zahvala.....	3
Sadržaj.....	4
Popis slika.....	6
Popis oznaka.....	7
Popis kratica.....	8
Sažetak.....	9
Summary.....	10
1.UVOD.....	11
2.NAČIN RADA LASERA.....	12
2.1. Spontana emisija.....	13
2.2. Stimulirana emisija.....	13
2.3. Svojstva laserske svjetlosti.....	14
2.4. Energetska stanja lasera.....	16
3.DIJELOVI LASERA.....	19
3.1. Aktivni medij.....	19
3.2. Laserska pumpa.....	19
3.3. Rezonator.....	20
4.VRSTE LASERA.....	21
4.1. Prema agregatnom stanju optičkog pojačala.....	21
4.1.1 Plinski laseri.....	21
4.1.2. Tekući laseri.....	22
4.1.3. Laseri čvrstog stanja.....	23
4.2. Prema načinu rada.....	24
4.2.1. Kontinuirani laseri.....	24
4.2.2. Pulsni laseri.....	25
4.3. Prema načinu pobude.....	25
4.3.1. Pobuda kemijskom reakcijom.....	25
4.3.2. Pobuda sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju.....	26
4.3.3. Pobuda optičkim sredstvom.....	26
4.4. Prema načinu primjene.....	27
4.5. Usporedba CO ₂ I Nd-YAG lasera.....	30
5. ZAVARIVANJE LASEROM.....	32
5.1. Zavarivanje taljenjem.....	32
5.2. Zavarivanje protaljivanjem.....	33
5.3. Zaštitni plin.....	34

5.4. Zavarljivost materijala.....	36
5.5. Primjena laserskog zavarivanja.....	37
6. USPOREDBA LASERSKOG ZAVARIVANJA SA OSTALIM TIPOVIMA ZAVARIVANJA.....	40
6.1. Usporedba laserskog zavarivanja i MIG/MAG zavarivanja.....	40
6.2. Usporedba laserskog zavarivanja i TIG zavarivanja.....	41
6.3. Usporedba laserskog zavarivanja i EPP zavarivanja.....	43
6.4. Usporedba laserskog zavarivanja i REL zavarivanja.....	45
6.5. Usporedba laserskog zavarivanja i plinskog zavarivanja.....	47
6.6. Robotizirano lasersko zavarivanje.....	48
7. ZAKLJUČAK.....	51
8. LITERATURA.....	52

Popis slika

Slika 1. Dijelovi prvog (rubinskog) lasera.....	12
Slika 2. Spontana i stimulirana emisija.....	12
Slika 3. Emisija spontane svjetlosti.....	13
Slika 4. Stimulirana emisija.....	14
Slika 5. Monokromatska svjetlost.....	15
Slika 6. Razlika koherentne i nekoherentne svjetlosti.....	15
Slika 7. Laser sa 3 energetska stanja.....	17
Slika 8. Laser sa 4 energetska stanja.....	18
Slika 9. Dijelovi lasera.....	20
Slika 10. Shema plinske cijevi.....	21
Slika 11. Shema tekućeg lasera.....	23
Slika 12. Dijelovi Nd:YAG lasera.....	24
Slika 13. Maxwellova raspodjela.....	26
Slika 14. Princip rada holograma.....	27
Slika 15. Laser za rezanje metala.....	29
Slika 16. Zavarivanje taljenjem.....	33
Slika 17. Zavarivanje protaljivanjem.....	34
Slika 18. Prikaz načina dovodenja zaštitnog plina.....	35
Slika 19. Koaksijalna mlaznica.....	36
Slika 20. Prstenasti uređaj.....	36
Slika 21. Oblici zavarenih spojeva.....	38
Slika 22. Zavarivanje tanjeg lima.....	38
Slika 23. Zavarivanje debljeg lima.....	38
Slika 24. MIG/MAG zavarivanje.....	40
Slika 25. TIG zavarivanje.....	42
Slika 26. EPP zavarivanje.....	44
Slika 27. REL postupak zavarivanja.....	45
Slika 28. Oprema za zavarivanje.....	46
Slika 29. Oprema za plinsko zavarivanje.....	47
Slika 30. Stupnjevi slobode robota.....	49
Slika 31. Robotizirano lasersko zavarivanje.....	49
Slika 32. Vođenje laserske zrake zrcalima (CO ₂).....	50
Slika 33. Optičko vođenje laserske zrake (Nd-YAG).....	50

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
Q	kJ/mm	Unesena toplina
d	mm	Promjer čestice
I	A	Jačina struje
S	mm/min	Brzina zavarivanja
dN	-	Broj molekula u određenom intervalu
c	m/s	Brzina
N	V	Broj molekula
h	Js	Planckova konstanta
v	Hz	frekvencija

Popis kratica

Kratica	Značenje
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
Nd-YAG	Neodimij: Itrij – Aluminiij – Granat
CW	Continuous wave
ZUT	Zona utjecaja topline
Al	Aluminiij
Cu	Bakar
He	Helij
Ar	Argon
N	Dušik
CO ₂	Ugljikov dioksid
O	Kisik
Mg	Magnezij

Sažetak

Laseri se u današnje vrijeme nalaze svuda oko nas. Veliku primjenu imaju u medicini, vojsci, industrijskoj proizvodnji, itd. U ovom radu opisana je važnost laserskog zavarivanja kao i njegovo višegodišnje razvijanje zbog zahtjeva industrije. Navedena je detaljna podjela lasera te je detaljno opisan postupak i radni medij specifičan za pojedino lasersko zavarivanje. Usporedno, navedene su i razlike ostalih vrsta zavarivanja, te njihove prednosti i nedostaci. Zaključno su navedeni svi najbitniji problemi kod ovakvog tipa zavarivanja.

Summary

Nowadays, lasers are everywhere around us. They are often used in medicine, military, industrial production, etc. This final work describes importance of laser welding and its developing through years because of industry requirements. In this work can be found classification in detail of lasers as well as description of procedure and working medium which is specific for some laser weldings. Parallel, there are differences between other categories of welding as well as advantages and disadvantages. Finally, all important problems of this kind of welding are cited.

1. Uvod

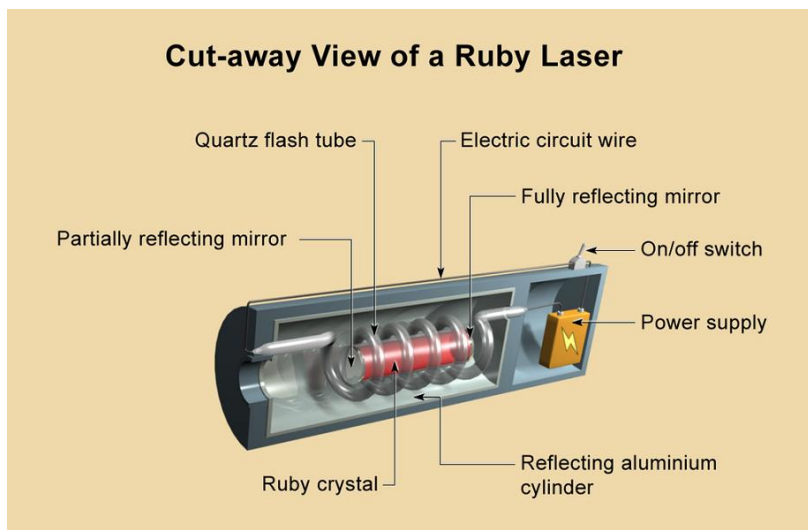
Laser (eng. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je uređaj koji pojačava svjetlost stimuliranom emisijom zračenja. Već sredinom 20. stoljeća napravljen je izvor svjetlosti nazvan laser. Svjetlost koju daje laser ima samo jednu valnu duljinu, odnosno jednu boju te je stoga nazivamo monokromatskom. Laserska svjetlost prenosi veliku energiju, a snop svjetlosti je paralelan pa se može precizno usmjeravati i na velike udaljenosti pri čemu se malo širi.

Primjena lasera je danas vrlo česta, gotovo u svim ljudskim djelatnostima. Koriste se pri zavarivanju, bušenju, a zbog velike preciznosti i u kirurgiji. Laserskim se snopom svjetlosti obrađuje očna leća i na taj se način ispravljaju kratkovidnost i dalekovidnost. Također, pomoću laserskog snopa zapisuju se i čitaju podaci sa CD-a.

Lasери služe i za mjerenje velikih udaljenosti na način da se snop svjetlosti usmjeri prema željenom objektu od kojega se taj snop odbije pa se mjerenjem vremena potrebnog do povratka svjetlosti i poznavanjem njene brzine može izračunati udaljenost.

1917.godine Albert Einstein objavljuje rad pod nazivom „O kvantnoj mehanici zračenja“ u kojem iznosi svoju teoriju o mogućnosti induciranog zračenja te predviđa izum lasera i njegove preteče masera (eng. Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Maser je uređaj za stvaranje i pojačavanje mikrovalova, a u suvremenoj inačici i za stvaranje te pojačavanje radiovalova i infracrvenog zračenja. Maser je izvor mikrovalova, dok je laser izvor elektromagnetskih valova u infracrvenom i vidljivom dijelu spektra.

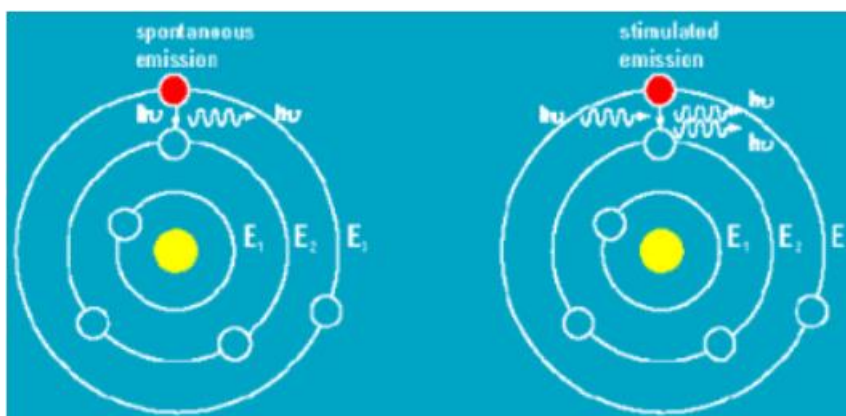
Prvi je laser napravio Theodore H. Mainman 1960.godine u Kaliforniji kada je objavio i prvi članak koji govori kako funkcionira jedan laser. To je rubinski laser sa štapićem rubina koji predstavlja krutu jezgru. Prvi rubinski laser imao je ksenonsku bljeskalicu u obliku spirale omotane oko štapića od rubina.



Slika 1. Dijelovi prvog (rubinskog) lasera

2. Način rada lasera

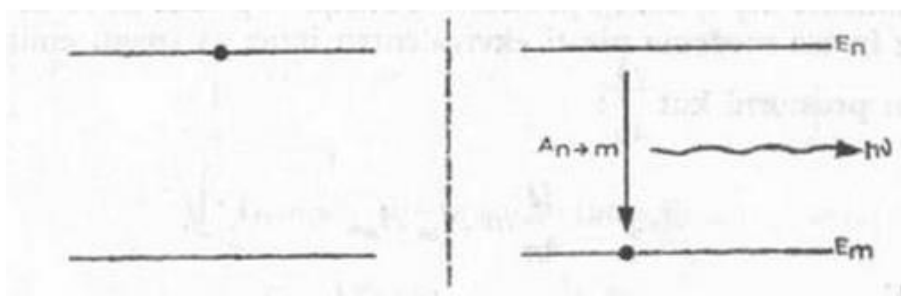
Laser prilikom svog rada emitira posebnu svjetlost određene snage i valne duljine. U ovisnosti o potrebi laserske svjetlosti, ona može biti spontana ili stimulirana.



Slika 2. Spontana i stimulirana emisija

2.1. Spontana emisija

Spontana emisija je proces u kojem atomi spontano prelaze iz područja višeg u područje nižeg energetskog stanja, nerijetko se naziva i emisijom obične svjetlosti. Naziv spontana emisija dobio je po tome što proces zbiva bez vanjskog utjecaja. Pri spontanom prijelazu atoma dolazi do otpuštanja fotona čija je energija jednaka energetskej razlici energetskih stanja. Nakon što atom prijeđe u područje određenog energetskog stanja zadržava se određeno vrijeme u tom stanju. Srednje vrijeme koje atom provodi u pobuđenom stanju, tj. vrijeme života atoma, je od 10^{-6} do 10^{-9} . Vrijeme života atoma je veća što je manja vjerojatnost prijelaza u niže energetske stanje. Za neka posebna pobuđena stanja srednje vrijeme je i do 10^5 puta veće, to stanje bitno za rad lasera naziva se metastabilno stanje.



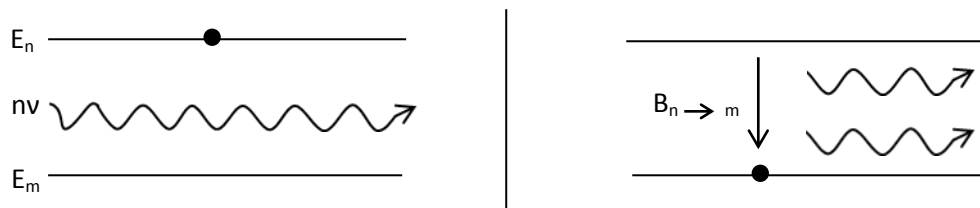
Slika 3. Emisija spontane svjetlosti

2.2. Stimulirana emisija

Inducirana tzv. stimulirana emisija često se naziva i emisijom laserske svjetlosti. Laserska se zraka proizvodi fenomenom stimulirane emisije zračenja. Postoje dva uvjeta emisije fotona koja moraju biti ispunjena kako bi moglo doći do nastanka laserske zrake. Prvi od uvjeta je taj da laserski medij mora sadržavati energijske razine (različita energetska stanja) čija energija odgovara energiji emitiranih fotona. Sljedeći uvjet odnosi se na to da većina atoma bude u pobuđenom stanju.

Proces stimulirane emisije pobuđen je vanjskim fotonom, što je jedan od razloga što se ovaj proces naziva stimulirana emisija. Vanjski foton je taj koji uzrokuje emitiranje oba fotona. Emitirani i vanjski fotoni imaju istu fazu, polarizaciju i smjer kretanja.

Drugi foton, koji je jednake energije kao prvi, stimulira prelazak atoma iz pobuđenog u osnovno stanje i tijekom tog procesa emitira se dodatni foton. Navedeni proces može se odvijati isključivo ako stimulacija nastupi prije isteka vremena života atoma koji se nalazi u pobuđenom stanju. Također je potrebno postići inverziju naseljenosti, tj. naseljenost gornjeg energetskeg stanja mora biti veća od naseljenosti donjeg energetskeg stanja. Inverzija naseljenosti se obično postiže pobuđivanjem atoma pomoću vanjskog izvora energije.

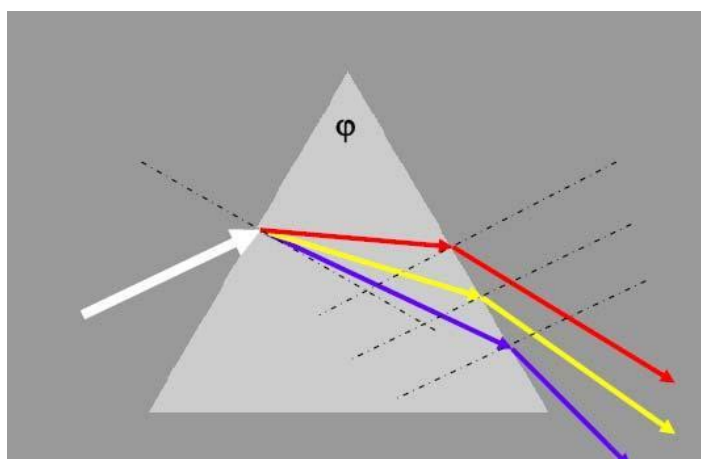


Slika 4. Stimulirana emisija

2.3. Svojstva laserske svjetlosti

Svjetlost je elektromagnetni val određene valne duljine, koji istodobno predstavlja širenje električnog i magnetskog polja u prostor. Ljudsko oko u pravilu može vidjeti svjetlost čija je valna duljina u rasponu od 380 do 780 nm. Kao što je rečeno, laserska svjetlost se sastoji od jedne ili više valnih duljina s određenim fazama. Prema tome, laserska svjetlost može biti monokromatska, koherentna i usmjerena.

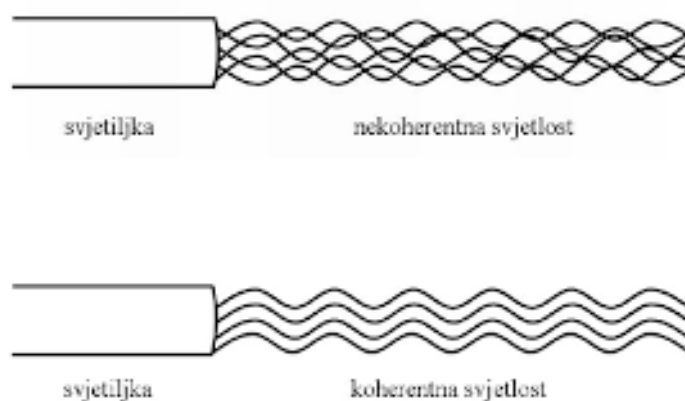
Monokromatska svjetlost se odlikuje po tome što se sastoji od elektromagnetnih valova jedne određene valne duljine što podrazumijeva postojanje jedne boje. Drugim riječima, zbog iste valne duljine, svjetlost koja nastaje iz lasera uvijek je iste boje.



Slika 5. Monokromatska svjetlost

Na slici 5 se može vidjeti kako bijela svjetlost mijenja svoju boju i razlaže na više boja prilikom prolaska svjetlosti kroz prizmu. Za razliku od bijele svjetlosti, kada monokromatska svjetlost prođe kroz prizmu, boja će ostati nepromijenjena iz razloga što sadrži samo jednu valnu duljinu koja je jedne boje.

Koherentnu svjetlost definiramo kao svjetlost koja je emitirana iz koherentnih izvora u kojima se titranja pojedinih atoma vremenski i prostorno podudaraju. Drugim riječima, ovo svojstvo laserske svjetlosti možemo definirati kao zračenje povezanih valova istog smjera te između tih valova razlika u fazi je konstantna, pa se stoga energija vala usredotočuje na jednu specifičnu i određenu točku.



Slika 6. Razlika koherentne i nekoherentne svjetlosti

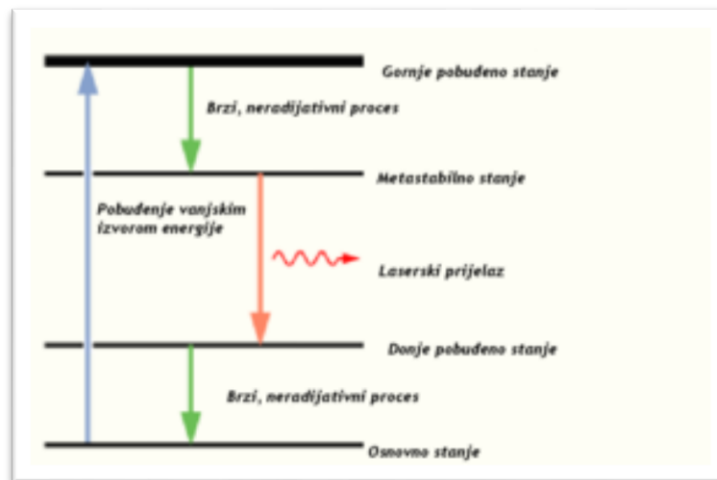
Zadnje bitno svojstvo kod laserske svjetlosti je usmjerenost. Usmjerenost zrake koju emitira laser je iznimno gusto koncentrirana te se stoga vrlo lako može usmjeriti i na veće udaljenosti bez pretjeranog rasipanja tijekom emitiranja. Dakle, laserska zraka će biti gusto koncentrirana i na većoj udaljenosti zbog toga što se zračenje širi u uskom, oštro ograničenom paralelnom snopu vrlo velike usmjerenosti. Kao primjer možemo navesti žarulju kojoj je glavna i jedina karakteristika osvjetljenje cijelog okolnog prostora, tj. njeno zračenje se širi na sve strane ravnomjerno i jednoliko. Sukladno tome možemo zaključiti da je usmjerenost laserskog zračenja puno veća od one koja se može postići običnim izvorom svjetla.

2.4. Energetska stanja lasera

Rasporedi energetske stanja osiguravaju lasersko djelovanje, a razlikujemo ih nekoliko. U ovom radu, pobliže će biti opisani laseri sa tri energetska stanja i laseri sa četiri energetska stanja.

Kod sustava s tri energetska stanja se vrlo lako postiže inverzija napučenosti, koja se znatno razlikuje od lasera sa manje od 3 energetske razine zbog njihove gornje granice tj. pobuđenog stanja. U ovom slučaju, inverzija napučenosti može se postići povećanjem napučenosti stanja više energije ili smanjenjem napučenosti stanja niže energije.

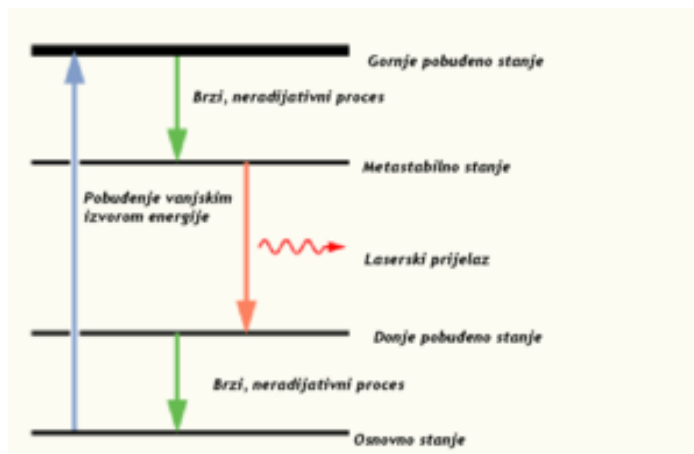
Kod lasera sa tri energetska stanja razlikujemo prvo, osnovno stanje (E1), nadalje imamo metastabilno stanje (E2) i na kraju već spomenuto pobuđeno stanje (E3).



Slika 7. Laser sa 3 energetska stanja

Kao što možemo vidjeti na slici 7, svi atomi se na početku procesa nalaze u osnovnom stanju energije koji se zatim pobuđuju na najviše pobuđeno stanje (E3). Atomi se potom zadržavaju jako malo u pobuđenom stanju, točnije 10^{-8} sekundi te tada prelaze u srednje metastabilno stanje (E2) u kojem se atomi zadržavaju puno duže, otprilike 10^{-3} sekundi. Nakon određenog vremena u metastabilnom stanju, više od 50% atoma će ostati u tom srednjem stanju i tada se postigne inverzija napučenosti između prve i druge razine. Na kraju cijelog tog procesa, laserska svjetlost nastati će pri prijelazu atoma sa metastabilnog stanja (E2) na osnovno stanje (E1).

Postoje laseri koji rade i na 4 energetske razine. U odnosu na sustav sa 3 energetska stanja, ovom sustavu se dodaje jedno dodatno pobuđeno stanje iznad osnovnog stanja koje ostaje prazno i brzo se relaksira, međutim osigurava inverziju napučenosti čak i ako je pobuđen vrlo mali broj atoma. To je glavni razlog što kod lasera sa 4 energetska stanja nisu potrebne velike snage pumpanja kao kod prethodno opisanog energetskog stanja. Dakle ukratko rečeno, poslije osnovnog stanja (E1) slijedi novo dodano donje pobuđeno stanje (E2), potom srednje metastabilno stanje (E3) i ono najviše gornje pobuđeno stanje (E4) kao što možemo vidjeti na prikazanoj slici 9.



Slika 8. Laser sa 4 energetska stanja

Između svih razina prenosi se određeni iznos energije koji predstavlja umnožak Planckove konstante i frekvencije svjetlosnog izvora koja se prikazuje formulom

$$E = h \cdot \nu$$

Prikazana energija atoma odgovara razlici energija između dvije energetske razine stanja. Pri određivanju energije jako je bitno odrediti valnu duljinu između dvije energetske razine stanja, a ona se određuje formulom

$$\lambda = \frac{c}{(E_2 - E_1) \cdot h} = \frac{1.2398}{(E_2 - E_1)}$$

U gore navedenoj formuli oznaka c predstavlja brzinu svjetlosti, h je Planckova konstanta i nazivnik pokazuje razliku između dviju energija stanja.

3. Dijelovi lasera

Laseri se sastoje od nekoliko osnovnih dijelova:

1. Aktivni medij
2. Laserska pumpa
3. Rezonator (2 zrcala)

3.1. Aktivni medij

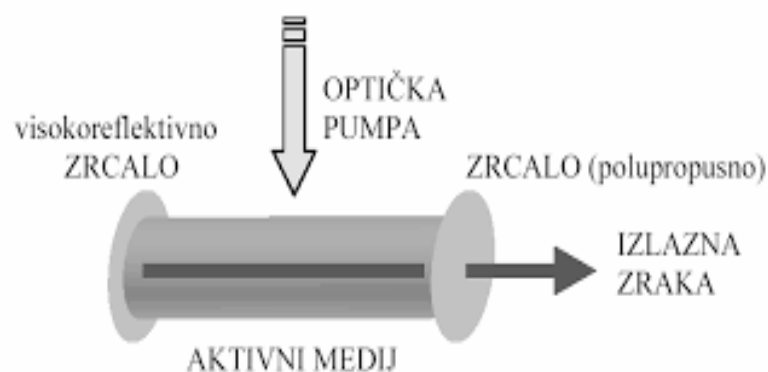
Aktivni, tj. laserski medij bitan je jer određuje na kojoj će valnoj duljini raditi laser. Mediji sa širim spektrom omogućuju podešavanje frekvencije, a time i valne duljine. Postoje različiti mediji u kojima laser može funkcionirati, a to su tekućine, plinovi i čvrste tvari. Tekućine su obično organska kemijska otapala u koja se dodaju bojila, a takvi se laseri nazivaju i laseri s bojilima. Plinovi mogu biti ugljični dioksid ili smjesa helij-neon. Kod čvrstih tvari obično je prisutna neka nečistoća kao npr. krom, neodimij ili titan. Primjeri lasera sa čvrstom jezgrom su Nd:YAG, rubin, Nd:staklo.

3.2. Laserska pumpa

Laserska pumpa je dio lasera koji omogućuje da laser posjeduje energiju potrebnu za rad. To može biti električno pražnjenje naboja, bljeskalica, elektrolučna svjetiljka, kemijska reakcija ili eksplozivno sredstvo. He-Ne laser koristi električno pražnjenje naboja u plinskoj mješavini helija i neona, a ekscimer laser kao lasersku pumpu koristi kemijsku reakciju jer ta laserska pumpa ovisi o materijalu.

3.3. Rezonator

Rezonator je sastavljen od dva paralelna zrcala od kojih je jedno od njih stopostotno reflektirajuće, dok je drugo reflektirajuće oko 90%. Između ta dva zrcala nalazi se aktivni materijal. Stopostotno reflektirajuće zrcalo ima ulogu da emitirane fotone ponovno vrati u aktivnu sredinu, a drugo zrcalo nakon toga propušta fotone van rezonatora i tako tvori laserski snop. Dakle, spontano emitirani fotoni putuju između ogledala u rezonatorskoj šupljini i pogađaju atome koji se već nalaze u pobuđenom stanju, nakon čega dolazi zapravo do stimulirane emisije.



Slika 9. Dijelovi lasera

4. Vrste lasera

U svijetu lasera postoji detaljna podjela koja ovisi o njihovoj primjeni i svojstvima:

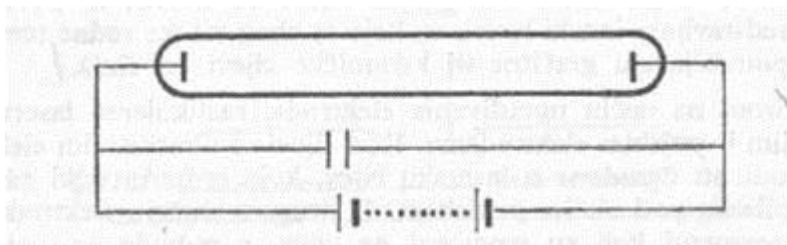
1. Prema agregatnom stanju optičkog pojačala: tekući, plinski i laseri čvrstog stanja
2. Prema načinu rada: kontinuirani i pulsni
3. Prema načinu pobude: optički, laser pobuđen kemijskom reakcijom, laser pobuđen sudarom elektrona i atoma u plinskom izboju, ozračivanje snopova česticama visoke energije
4. Prema načinu primjene

4.1. Prema agregatnom stanju optičkog pojačala

4.1.1. Plinski laseri

Plinski laseri se približe dijele na atomske, ionske, molekularne i kemijske. Plinski laseri kao što im samo ime kaže, imaju radni medij u plinovitom stanju.

Najčešće korišteni plinski laseri su: He-Ne laser (helij-neon) i CO_2 laser ili argonski laser, dok su manje korišteni molekularni i kemijski laser.



Slika 10. Shema plinske cijevi

Atomski laser (helij-neon) ima cijev ispunjenu plinom slobodnih atoma koji se pobuđuju električnim izbojem. Postoje 2 glavna faktora koji utječu na koncentraciju atoma u različitim energetske stanjima, a to su: broj sudara elektrona sa atomima i energetska promjena pobuđenih atoma kroz spontanu emisiju. Broj sudara elektrona sa atomima ovisan je o broju prisutnih elektrona odnosno o struji koja prolazi kroz cijev što znači da se može kontrolirati. Drugi spomenuti faktor ovisi o karakteristikama atoma i o eksperimentalnim uvjetima u kojima se proces izvodi. No problem je što elektroni koji vrše pobuđivanje atoma plina (neon) neelastičnim sudarom imaju različite brzine.

Atomi neona imaju velik broj energetske nivoa na koje se mogu pobuditi, pa će rezultat toga biti veliki broj pobuđenih neonskih iona od kojih će se samo jedan iskoristiti u laserskoj akciji, dok su svi ostali izgubljeni. To je predstavljalo problem u konstrukciji lasera, dok se postojećem plinu nije atom koji sadrži metastabilne nivoe, tj. atome helija.

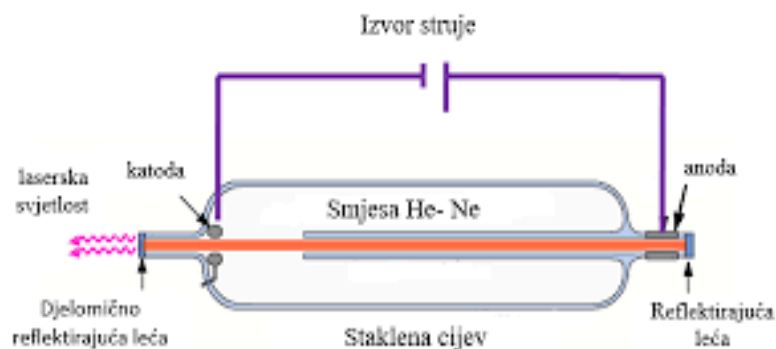
Prvi He-Ne laser konstruirao je Ali Javan sa suradnicima. Prvi takav laser sastojao se od vanjske elektrode i imao je pobudu iz visokofrekventnog generatora otprilike oko 20Mhz.

Argonski se laseri razlikuju od ostalih plinskih lasera zato što njihova svojstva omogućuju da se stvori snažni laser sa kontinuiranim režimom rada u vidljivom i ultraljubičastom području spektra. Princip rada argonskog lasera temelji se na tome da se neutralni atom najprije ionizira direktnim sudarom sa elektronom, a tako se pozitivni ion pobudi na različite energetske nivoe odgovarajućim sudarima sa elektronima. Argonski laser može djelovati na 8 valnih dužina. Međutim, ako se zahtijeva proces na jednoj valnoj dužini, tada se postavi disperziona prizma koja vrši diskriminaciju neželjenih valnih dužina.

4.1.2. Tekući laseri

U usporedbi s plinovima i čvrstim tijelima, tekućine također posjeduju povoljna svojstva koja ih čine pogodnim laserskim materijalima. Tekućine omogućuju jednostavnije hlađenje nego kod čvrstih tijela, jednostavnom cirkulacijom aktivnog medija. Nedostatak tekućeg laserskog medija leži u tome što imaju veliki koeficijent termičke ekspanzije koji smanjuje kvalitetu lasera. Kod konstruiranja lasera na tekućem mediju najvažnije je izabrati materijal koji pokazuje luminiscenciju u tekućoj fazi.

Najviše su se u tu svrhu koristile organske tekućine jer imaju puno veću luminiscenciju u odnosu na anorganske tekućine kod koje je isto prisutna, ali u jako malim količinama. Prvi kojima je pošlo za rukom ostvariti laserski efekt na tekućini su Lempicki i Samelson 1963.godine.



Slika 11. Shema tekućeg lasera

4.1.3. Laseri čvrstog stanja

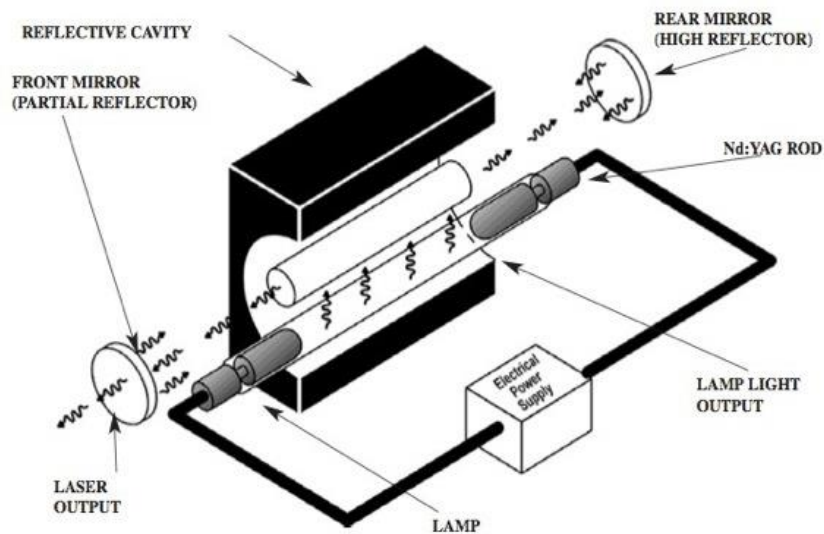
Čvrsto tijelo sastoji se od velikog broja atoma, iona ili molekula. Ako su u tom prostoru atomi, ioni i molekule ravnomjerno raspoređeni onda govorimo o kristalu jer tako tvore kristalnu rešetku, a ako prostor ispunjavaju bez nekog reda onda govorimo o amorfnom tijelu.

Kao aktivni medij kod lasera čvrstog stanja koriste se kristali i stakla. Oni apsorbiraju svjetlost, ali je ne luminisciraju već energiju predaju rešetci. Postoji dvadesetak vrsta laserskog čvrstog stanja. Najpoznatiji laseri čvrstog stanja pravilne strukture su YAG laseri koji se sastoje od štapića itrij-aluminijevog granata (YAG), dopiranog atomima neodimija. Prvi laser koji je davao vidljivu svjetlost bio je rubinski laser, a takav laser kao lasersku jezgru koristi štapić od rubina.

Nd:YAG Laser je laser sa krutom jezgrom koji se sastoji od štapića itrij-aluminijevog granata, dopiranog atomima neodija. Aktivni medij lasera su trostruko ionizirani ioni neodija. Nd:YAG je laser koji posjeduje 4 stupnja i emitira infracrveno zračenje valne dužine 1064 nm.

Ovakvi laseri nisu jedini koji mogu posjedovati samo ovaj materijal, mogu se napraviti i slični laseri od drugih materijala koji sadrže neodij, npr. itrij-litijev fluorid (YLF), itrijev vanadat (YVO_4) ili staklo. Staklo nema tako pravilnu kristalnu strukturu pa spektralne linije nisu tako oštre kao kod Nd:YAG lasera.

Nd:YAG laseri koriste se za rezanje, bušenje, graviranje i drugu obradu metala. Također koriste se u automobilskej industriji i u brojne medicinske svrhe.



Slika 12. Dijelovi Nd:YAG lasera

4.2. Prema načinu rada

4.2.1. Kontinuirani laseri

Kontinuirani laser (cw) ima stalan intenzitet emitiranog vala u jedinici vremena. Kod ovakvog lasera optičko se pojačalo nalazi između dva paralelno postavljena zrcala. Jedno zrcalo je stopostotno reflektirajuće, a drugo propušta određenu količinu svjetla.

Snop se unutar rezonatora reflektira, raste gustoća energije zračenja i nakon postizanja uvjeta za lasersku akciju snop izlazi iz laserske šupljine kroz zrcalo koje je djelomično propusno.

4.2.2. Pulsni laseri

Kod pulsnih lasera najčešće se koristi potpuno neprozirna zrcala, ali se samo jedno od njih periodički pomiče izvan optičkog puta lasera. Kada je zrcalo na mjestu, ono zarobljava lasersku zraku unutar rezonatora gdje se ona pojačava.

Međutim, kada se zrcalo pomakne, iz lasera izlazi kratki puls intenzivnog laserskog zračenja. Pulsevi koji izlaze iz lasera mogu se proizvesti i stavljanjem određenog bojila u rezonator.

U današnje vrijeme se često prave laseri koji odašilju i do 50 pulseva u sekundi, a pojedini pulsevi traju oko jedne femtosekunde. To pokazuje da će se energija osloboditi u otprilike dvadesetak vrlo kratkih pulseva u vremenskom periodu od jedne sekunde.

4.3. Prema načinu pobude

4.3.1. Pobuda kemijskom reakcijom

Kemijskim se reakcijama pobuđuje plinoviti laserski medij koji se sastoji od dvije ili više kemijski aktivnih komponenti.

Kod kemijskih lasera postoje kemijske reakcije koje mogu proizvesti molekule u stanju pobude. Takav primjer je fluorovodični laser koji koristi reakciju vodika i fluora, za proizvodnju fluorovodika u pobuđenom stanju.

Prednost kemijskih lasera je ta što se pobuda dobiva samom kemijskom reakcijom bez ikakvog vanjskog djelovanja. Kemijski laseri su po mnogočemu slični sa plinskim laserima jer se sastoje od većinom iste smjese plinova.

4.3.2. Pobuda sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju

Ovaj način pobude je najefikasniji za svaki plinski medij, bez obzira radi li se o atomskom, ionskom ili molekularnom laseru. Prolaskom struje kroz plin može se postići dovoljno intenzivna emisija, a proces na kojem se ona bazira su međusobni sudari elektrona sa atomima ili molekulama.

U plinu koji se nalazi u termičkoj ravnoteži, brzine atoma ili molekula raspoređene su prema Maxwelllovoj raspodjeli koja glasi:

$$\frac{dN}{N} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 e^{-\left(\frac{v}{v_0} \right)^2} d \left(\frac{v}{v_0} \right)$$

Slika 13. Maxwelllova raspodjela

Za klasični idealni plin, jedina veličina koja karakterizira česticu je njen impuls, odnosno brzina. To znači da je osnovna jednočestična informacija raspodjela brzina čestice u plinu. Ta informacija naziva se Maxwelllovom raspodjelom i računa se prema formuli prikazanoj na slici 13.

Energija ove pobude vidljiva je u UV području pa se i emisija tamo događa. Dakle, emisija je u području gdje je vidljiva energija titranja.

Kao primjer mogu navesti vibracijsku pobudu kojoj je energija titranja prisutna u IC području, pa je i emisija u tom području. Translacije cijele molekule povezane su sa toplinom.

4.3.3. Pobuda optičkim sredstvom

Optičko sredstvo možemo definirati kao vakuum ili neku prozirnu tvar kojom se može širiti vidljiva svjetlost. Glavno svojstvo optičkog sredstva je da propušta elektromagnetske valove, no propusnost uvelike ovisi o međudjelovanju fotona i molekula u optičkom sredstvu.

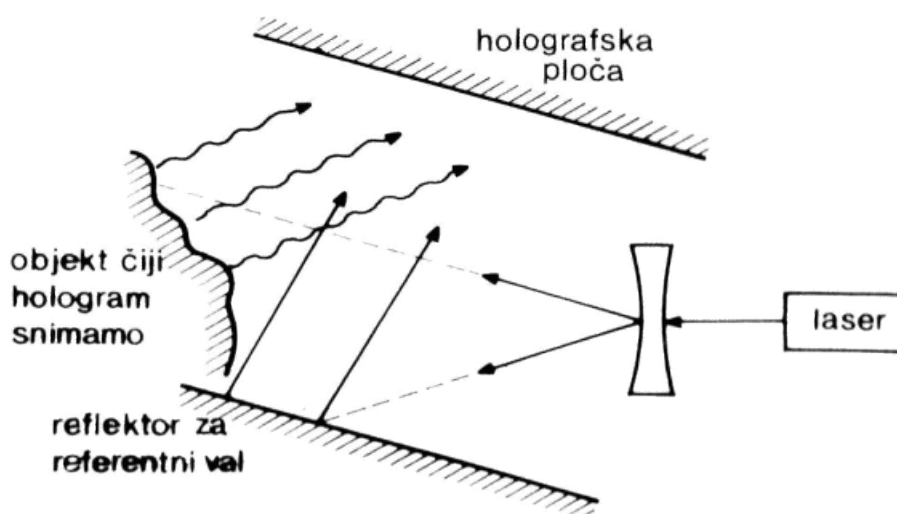
4.4. Prema načinu primjene

Lasери su u današnje vrijeme našli primjenu u mnogobrojnim granama industrije. Prisutni su od svakodnevnog života kao npr. kartičnog poslovanja, do medicine pomoću kojeg se izvode brojne i različite operacije.

U svakodnevnoj uporabi laseri su prisutni od računalnih igrica do kreditnih kartica. Tako ih možemo naći u bar-code čitačima, hologramima, direktnom prijenosu podataka, laserskim printerima. Laserski printer radi na principu da laserska zraka iscrtava tekst. Ta laserska zraka predstavlja statički električnost kojeg laserski pisači koriste kao privremeno „ljepilo“ za koje se lijepi tinta.

Laseri se također puno koriste u medicinske svrhe, poput operacije očiju i zubiju, uklanjanje tetovaža, liječenje raka te kod dermatoloških zahvata. Laserski snop je postao iznimno precizan kirurški skalpel stoga je zapravo najprisutniji u kirurgiji. Laser omogućuje operacije bez krvarenja, što je posebno važno kod pacijenata koji imaju poremećaj zgrušavanja krvi.

Dio medicine koji nije spomenut, a iznimno je bitan za laser i njegovo djelovanje je vezan uz holografiju. Holografija je princip dobivanja i stvaranja trodimenzionalnih slika pomoću laserskog snopa. Sam postupak holografije je iznimno složen i skup te se zato rijetko koristi osim u teškim slučajevima kada se pristupačnijim i jednostavnijim metodama ne može postići bolji rezultat.



Slika 14. Princip rada holograma

Laseri se također mnogo primjenjuju u vojnoj industriji. Vojska je oduvijek bila sklona testiranju i unaprijeđivanju svoje tehnologije i oružja kojim raspolažu. Tako je laser našao svoju primjenu kod označavanja mete laserskom zrakom u snajperima, navođenja raketnih projektila te mjerenja udaljenosti mete. Dakle, u vojnoj industriji laser nije prisutan samo u jednoj određenoj sferi nego nalazi veoma širok spektar primjene i djelovanja.

Također, laseri su našli svoju primjenu u mjerenju i 3D modeliranju. Putem lasera mogu se jednostavno odrediti udaljenosti i kutevi, tj. razmak između izmjerenih točaka. Svaka od tih točaka može biti prezentirana u prostoru sa svojim 3D koordinatama.

Ovakvo mjerenje izuzetno je bitno za inženjere geodezije jer svaki odašlani laserski puls kao krajnji rezultat predstavlja prostornu informaciju. Mnoštvo točnih 3D prostornih podataka prikupljenih u jednom trenutku postojanja nekog objekta (građevine) izgledaju poput fotografije. Razlika između njih je, dakako, za cijelu dimenziju u korist prvih. Obradom je moguće izvoditi detaljne modele, a izvorni podaci mjerenja ostaju kao dostupan izvor informacija o promatranom objektu.

Najčešća laserska obrada materijala koristi se pri zavarivanju koje se izvodi sa CO_2 laserom. Snop lasera usmjeri se na jednu točku te se tako dobije dovoljna snaga da bi se materijal krenuo topiti.

Kao kod svake vrste zavarivanja postoje prednosti i nedostaci. Prednosti laserskog zavarivanja su visoka kvaliteta zavarenog spoja, velika preciznost, te vrlo velika brzina.

Nedostatak ovakvog zavarivanja je to što je skuplji i nepristupačniji od ostalih tipova zavarivanja pa nije toliko zastupljeno.

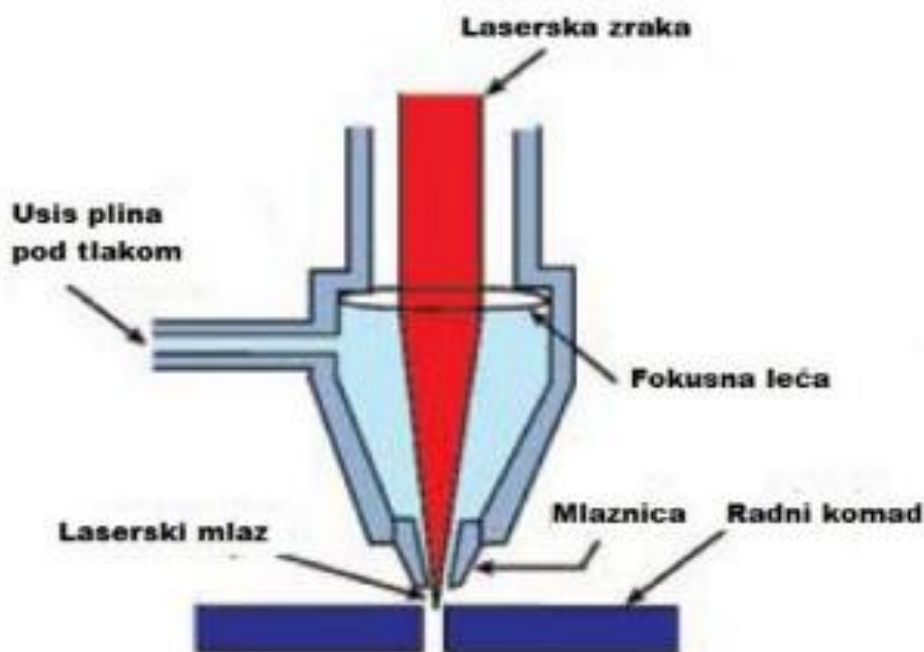
Isto tako, bitno je staviti naglasak na lasersko rezanje metala. Samo rezanje laserom je toplinski postupak rezanja materijala u kojem rezonator stvara lasersku zraku koja se usmjeri jednu točku vrlo malog promjera.

Ovakvo rezanje metala ima jednu veliku prednost, a to je vrlo visoka preciznost i ona se koristi najčešće u metalurgiji, elektronici, brodogradnji. Neke od ostalih prednosti ovog tipa rezanja su male deformacije metala, velika brzina rezanja, mali unos energije, tj. stvara se mala zona utjecaja topline (ZUT), fleksibilnost, preciznost i ono najbitnije, velika kvaliteta reza.

Neki od glavnih nedostataka rezanja laserom zbog kojih se upotrebljavaju druge tehnike rezanja metala su prvenstveno visoki investicijski troškovi.

Ako nije potrebna visoka preciznost i kvaliteta reza, mnogi će prije izabrati neku povoljniju tehniku rezanja.

Također, pod nedostatke laserskog rezanja spadaju i visoki operativni troškovi, niska iskoristivost energije te problematično rezanje materijala većih debljina.



Slika 15. Laser za rezanje metala

Rezanje metala laserom izvodi se pomoću CO₂ lasera, Nd lasera i Nd-YAG lasera koji su ime dobili prema vrsti aktivnog materijala. Energetski impulsi i male brzine ponavljanja su obilježja koja su karakteristična za takve tipove lasera. Za rezanje metala potrebna je različita količina topline, ovisno o materijalu na kojem se postupak izvodi. Shodno tome možemo zaključiti kako se najviše topline koristi kod obrađivanja nehrđajućeg čelika i aluminija.

Jedni od najvažnijih parametara laserskog rezanja metala su kontinuirane, odnosno impulsne zrake. Kontinuirane zrake najčešće se primjenjuju kod materijala koje karakteriziraju glatkoća i debljina, dok se impulsne zrake primjenjuju pretežno za precizna rezanja.

4.5. Usporedba CO₂ i Nd-YAG lasera

	CO ₂	Nd-YAG
Valna duljina	10.6 μm	1.06 μm
Snaga	40 kW	6 kW
Kvaliteta zrake	bitno bolja	lošija
Pumpanje	električno	optičko
Iskoristivost	5-10 %	2-3%
Gustoća snage	10 ³ -10 ⁸ W/cm ²	
Apsorpcija	metali loša	metali dobra
Vođenje zrake	ogledalima	optičkim vlaknom
Režim rada	cw i impulsni	cw i impulsni
Hlađenje	potrebno	potrebno

CO₂ laser je dominantni plinski laser kod kojeg je aktivni materijal mješavina plinova N₂, He, CO₂. On djeluje u infracrvenom području što znači da njegove valne duljine nisu vidljive golim okom. Primjenjuje se pretežno za rezanje, ali moguća je i njegova upotreba kod zavarivanja.

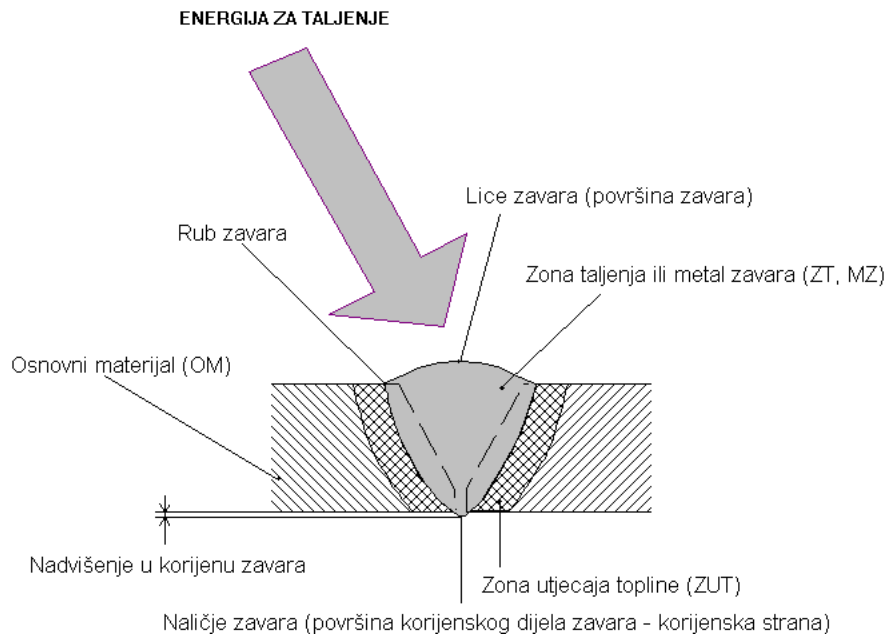
Nd-YAG je kruti laser, a njegov aktivni materijal čini Nd-YAG kristal. Također emitira i infracrvenu svjetlost, ali znatno manje valne duljine i snage nego što to radi CO₂ laser. Najčešće se upotrebljava za označavanje i rezanje debljih strukturnih elemenata s velikim brojem ponavljanja. Kao i CO₂ laser, i Nd-YAG moguće je koristiti prilikom zavarivanja.

5. Zavarivanje laserom

Zavarivanje laserom definiramo kao pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. Bitno je napomenuti razliku po kojoj se laserska svjetlost razlikuje od obične svjetlosti. Naime, kod lasera se valovi poklapaju, dok kod obične svjetlosti to nije slučaj. Navedeni postupak vrši se pomoću topline dobivene energijom snopa ubrzanih svjetlosnih čestica. Zavarivanje laserskim snopom obavlja se uz zaštitu inertnim plinovima kao što su npr. helij, neon, argon, ugljikov dioksid i mješavine. Također ovom tehnikom je moguće zavarivanje metala vrlo malih debljina. Glavne karakteristike navedene tehnike su velika brzina zavarivanja, koja može doseći i brzinu od 10 m/min, vrlo male deformacije i visoka kvaliteta nastalog spoja. Zavarivanje laserom dijeli se na dvije osnovne tehnike, a to su zavarivanje taljenjem i zavarivanje protaljivanjem (tehnika ključanice).

5.1. Zavarivanje taljenjem

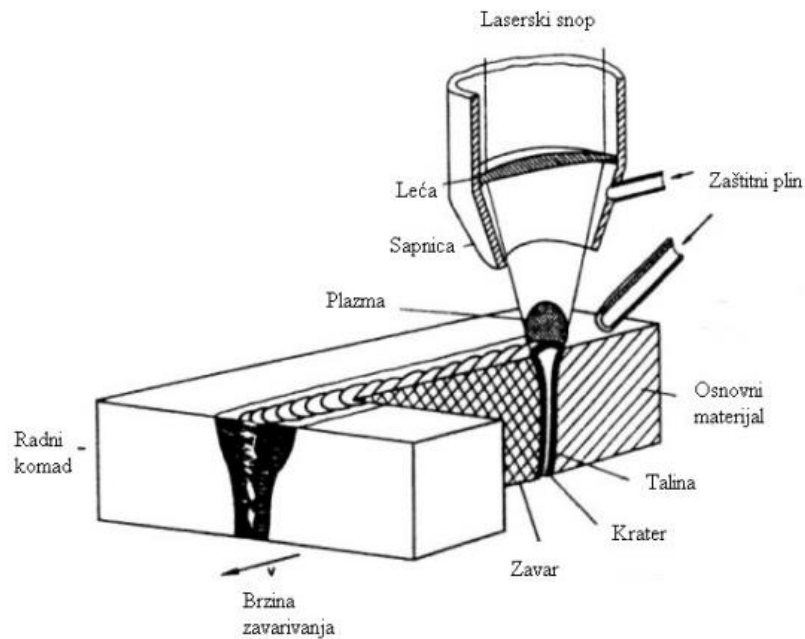
Zavarivanje taljenjem karakterizira spajanje metalnih dijelova koji se nalaze u rastaljenom stanju na mjestu spajanja. Moguće je korištenje dodatnog materijala tijekom zavarivanja, ali nije neophodno. Tehnika se vrši malom gustoćom snage snopa koja je za svaki materijal različita. Gornja granica gustoće snage prije nego započne zavarivanje protaljivanjem iznosi 10^6 W/cm^2 . Dovođenjem topline u radni komad raste penetracija i smanjuje se brzina zavarivanja. Dobiveni zavari ovom tehnikom su široki i plosnati, a odnos njihove širine i penetracije manji je od jedan.



Slika 16. Zavarivanje taljenjem

5.2. Zavarivanje protaljivanjem

Energija laserskog snopa tijekom zavarivanja protaljivanjem koncentrirana je u jednoj točki koja se nalazi na liniji spoja, a površina joj je vrlo mala. Materijal u žarišnoj točki zagrijava se do vrlo visokih temperatura nakon čega dolazi do isparavanja dijela materijala uzrokujući nastanak dubokog kratera takozvane ključanice oko kojeg se metal tali. Pomicanjem laserskog snopa dolazi do popunjavanja kratera talinom koja se vremenom skrućuje što naposljetku dovodi do nastajanja zavara. U odnosu na zavarivanje taljenjem, tijekom zavarivanja protaljivanjem rastaljeni metal apsorbira više energije. Zavari nastali navedenom tehnikom zavarivanja su uski i duboki, a odnos njihove širine i penetracije kreće se od 1 do 5. Poteškoće kod zavarivanja protaljivanjem javljaju se najčešće kod materijala koji imaju visoku refleksiju tipa Al i Cu.



Slika 17. Zavarivanje protaljivanjem

Gustoća snage glavna je razlika između navedenih tehnika zavarivanja naime, kod zavarivanja taljenjem gornja granica je 10^6 W/cm^2 , dok zavarivanje protaljivanjem tek započinje nakon što gustoća snage prijeđe gornju granicu kod taljenja. Tehnike se također razlikuju u obliku i veličini zavara.

5.3. Zaštitni plin

Zaštitni plin igra jako veliku ulogu kod laserskog zavarivanja na način da štiti talinu od utjecaja atmosferskih plinova. Također, potreban je za poboljšanje estetskog izgleda i mehaničkih svojstava zavara, zaštićuje krater otpuhivanjem plazme i optiku za fokusiranje od para i štrcanja. Koji zaštitni plin ćemo odabrati ovisi ponajprije o valnoj duljini lasera, unesenoj energiji, vrsti materijala i protoku i dovodu plina. Posebna pažnja se posvećuje protoku plina jer ako je neodgovarajući izaziva turbulencije, lošu kvalitetu zavara i oštećenje optike.

Zaštitni plinovi dijele se na inertne i aktivne plinove.

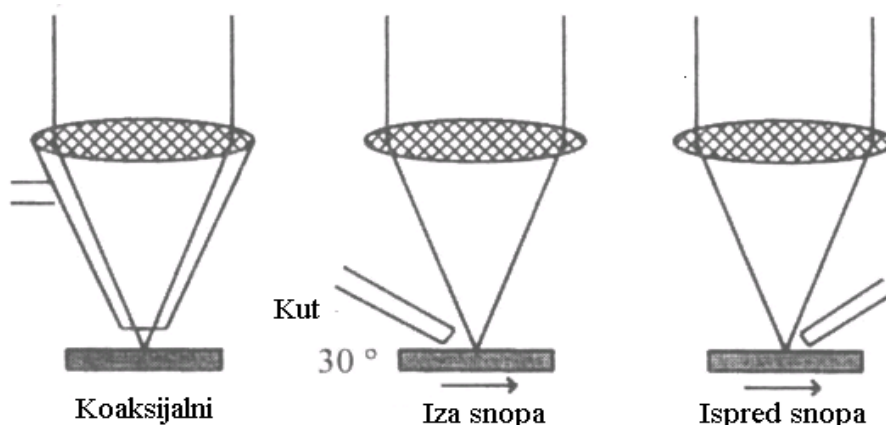
Pod inertne plinove spadaju He i Ar koji su najbolji u pružanju zaštite od oksidacije i prijevremenog ohlađivanja. He karakteriziraju visoka energija ionizacije, mala atomska masa i vrlo visoka toplinska vodljivost.

Glavni nedostatak helija je financijske prirode, naime puno je skuplji nego što je to argon. Argon kao zaštitni plin najčešće se koristi pri zavarivanju tankih materijala jer ga karakterizira nereagiranje sa laserskim snopom.

Aktivnim plinovima smatramo N, CO₂ i O. Glavna prednost aktivnih plinova u odnosu na inertne je njihova veća pristupačnost u cijeni. Prilikom primjene ovog tipa zaštitnih plinova dolazi do povećanja brzine zavarivanja. Također, dolazi i do ulaska dušika i kisika u zavar što za posljedicu ima povećanje tvrdoće i poroznosti zavara, kao i smanjenje deformabilnosti. Zaštita plinom CO₂ koristi se pretežno kod pulsnih CO₂ lasera jer njegovim reagiranjem s laserskim snopom dolazi do oblikovanja snažnog oblaka plazme, a kod pulsnih lasera je vrijeme trajanja pulsa prekratko da bi došlo do oblikovanja navedene plazme.

Nerijetko se koriste i mješavine plinova kao zaštita tijekom zavarivanja, a u neke od najčešćih kombinacija spadaju helij – argon, helij – dušik, argon – ugljikov dioksid.

Načini dovođenja zaštitnog plina na mjesto zavarivanja mogu biti koaksijalni i sa strane (ispred ili iza).

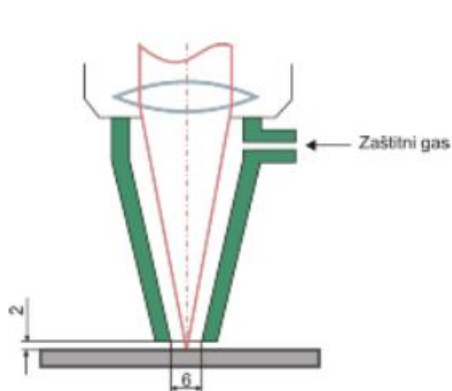


Slika 18. Prikaz načina dovođenja zaštitnog plina

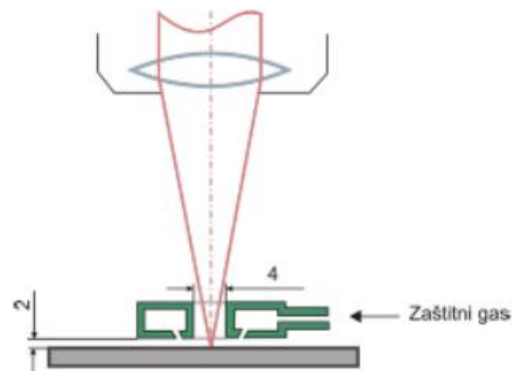
Bitno je prilikom zavarivanja odabrati odgovarajuću vrstu, protok i dovod zaštitnog plina kako ne bi došlo do pojave oksida i obojenja na površini zavara. Odabir oblika i konstrukcije uređaja koji se koristi za dovođenje zaštitnog plina ovisi o mogućnostima pristupa spoju kao i mogućnostima laserskog sistema.

Uporabom Nd-YAG lasera koristi se jednostavna cijev koja je izrađena od bakra, iako je i moguće korištenje uređaja koji ima prstenasti oblik čiji se otvor postavlja aksijalno s laserskim snopom.

Koaksijalna mlaznica smatra se najpraktičnijim i najefikasnijim uređajem za dovod zaštitnog plina. Koristi se prilikom automatiziranog i robotiziranog zavarivanja materijala debljine do 4 mm i brzine zavarivanja do 1 m/min.



Slika 19. Koaksijalna mlaznica



Slika 20. Prstenasti uređaj

5.4. Zavarljivost materijala

Pod zavarljivost podrazumijevamo sposobnost materijala da se ostvari kontinuirani zavareni spoj pri povoljnim uvjetima zavarivanja. Nastali zavareni spoj mora zadovoljavati kriterije mehaničkih značajki i njihov utjecaj na konstrukciju. Kod konstrukcijskih čelika, pojam zavarljivosti odnosi se na nepojavljivanje pukotina u zoni utjecaja topline. Postoji puno uvjeta koji trebaju biti ispunjeni kako bi postigli dobru zavarljivost. Jedan od bitnijih uvjeta je osigurati zadovoljavajuću žilavost osnovnog materijala kao i kemijski sastav kako ne bi došlo do pojave krhkosti materijala nakon hlađenja. Također, poželjan je što manji postotak ugljika jer se njime pogoršava zavarljivost materijala, ali se poboljšavaju mehanička svojstva materijala kao što su tvrdoća i krhkost.

Kako bi postigli dobru zavarljivost, zavarivanje se mora obavljati bez posebnih predradnji i mjera opreza. S druge strane, ako to nije izvedivo, tada ni kvaliteta zavarljivosti neće biti prihvatljiva.

Nerijetko se proučava zavarljivost i obavljaju razna istraživanja na području zavarljivosti materijala pri laserskom zavarivanju.

U nekom od tih istraživanja utvrđena je mogućnost laserskog zavarivanja svih metalnih materijala te nekih plastičnih materijala. Najčešće se kao materijal koristi čelik jer on dobro apsorbira lasersku svjetlost.

Kod raznih vrsta čelika postoji mogućnost pojave pukotina koje su rezultat veće brzine hlađenja debljih dijelova. Također, na pojavu pukotina utječe i stvaranja područja povišene tvrdoće i niske žilavosti u zoni utjecaja topline.

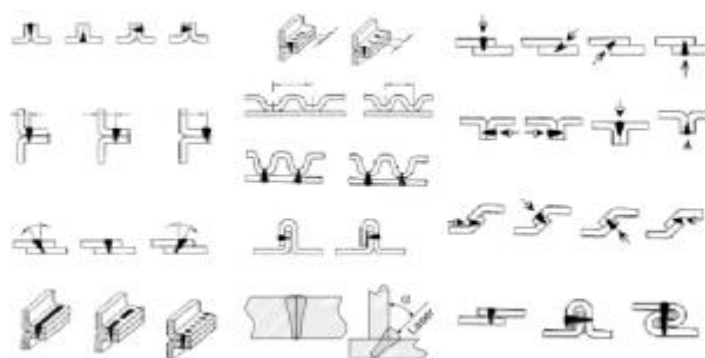
Postoje razne vrste sprječavanja pojave pukotina pod koje spadaju smanjenje ukupne krutosti strukture, smanjenje brzine hlađenja i smanjenje količine apsorbiranog vodika.

Zaključno, zavarljivost je važan pojam u zavarivačkoj industriji jer se odnosi i na osnovni i dodatni materijal. Faktori koji imaju najvećeg utjecaja na zavarljivost je sami materijal koji se zavaruje, konstrukcija tj., oblikovanje zavara te način izrade postupka zavarivanja tj., vrsta tehnologije.

5.5. Primjena laserskog zavarivanja

Laser je svjetlosni oscilator, odnosno generator koherentnog zračenja. Laseri se danas nalaze u širokome spektru proizvoda koje, bez svijesti o prisustvu lasera, koristimo svakodnevno. Nalaze se u koječemu od CD playera i zubarskih bušilica pa sve do visokobrzinskih strojeva. Prije početka zavarivanja laserom potrebna je temeljita priprema podloge i materijala. Lasersko zavarivanje najčešće se upotrebljava u automobilskoj, elektroničkoj i zrakoplovnoj industriji, a zadnjih nekoliko godina i u brodogradnji, te naftnoj industriji. Također, jedno od važnijih područja primjene laserskog zavarivanja je i precizna tehnika. Dijelovi motora, zupčanici, vratila, cilindri i limovi su elementi automobilske industrije koji se najčešće spominju kod zavarivanja. Što se tiče elektroničke industrije tu prevladavaju kućišta, mikro priključci i termoelementi.

Zbog svojih specifičnosti zahtjeva se prilagođeno konstrukcijsko oblikovanje zavarenih spojeva.



Slika 21. Oblici zavarenih spojeva

Tehnikom laserskog zavarivanja zavaruju se svi materijali, jedino što se nerijetko zna pojaviti problem kod materijala s refleksijom. Za debljine limova manjih od 3 mm koriste se laseri male snage do 1 kW i impulsni laseri. Nd-YAG laseri, kojima se snaga procjenjuje i do 10 kW, pogodni su za zavarivanje npr. zubnih proteza jer mogu proizvesti male količine taline. CO₂ laseri, čija se snaga penje do 50 kW, koriste se uglavnom za zavarivanje tehnikom ključanice (zavarivanje protaljivanjem) limova od 0,8 mm do 15 mm.



Slika 22. Zavarivanje tanjeg lima



Slika 23. Zavarivanje debljeg lima

Slika 22 prikazuje primjer zavarivanja laserom preklopnog spoja tanjih limova, riječ je o izmjenjivaču topline. On nastaje hidrauličkim deformiranjem limova nakon zavarivanja. U ovom slučaju upotrijebljen je CO₂ laser jer je on jedan od lasera koji pruža visoku čvrstoću zavora, što izmjenjivač topline zahtijeva.

Na slici 23 je vidljivo zavarivanje lima čija debljina prelazi i 5 milimetara, stoga je potreban laser snage preko 5 kW. Ovakav tip zavarivanja najčešće se koristi u brodogradnji.

Zaključno, kao i u mnogim drugim tehnikama zavarivanja i kod laserskog zavarivanja nailazimo na njegove prednosti i nedostatke.

Glavna pozitivna karakteristika koja se veže uz lasersko zavarivanje je prvenstveno njegova velika brzina rada i visoka kvaliteta zavara, koje ga ujedno i najviše razlikuju od ostalih tehnika zavarivanja. Zona utjecaja topline (ZUT) prilikom zavarivanja ovom tehnikom je jako mala, tj. utjecaj topline na okolni materijal je jako mali ili čak nikakav. Tijekom zavarivanja ne dolazi do kontakta između zavarivača i radnog komada, što je također jedna od karakteristika zbog koje se odabire zavarivanje laserom. Isto tako, tehnika je fleksibilna i ekonomična i kod proizvodnje malih serija. Također, penetracija je vrlo visoka uz uske zavare.

Uz sve navedene pozitivne karakteristike, ipak postoje i neke negativne značajke koje je vrijedno spomenuti. Glavni nedostatak zbog kojeg se zavarivači ne odlučuju na zavarivanje ovom tehnikom proizlazi iz financijskog aspekta. Naime, ova tehnika zavarivanja najskuplja je tehnika na tržištu. Također, potreban je visoko obrazovan zavarivač jer tehnika zahtijeva precizno pozicioniranje radnog komada i vođenje snopa.

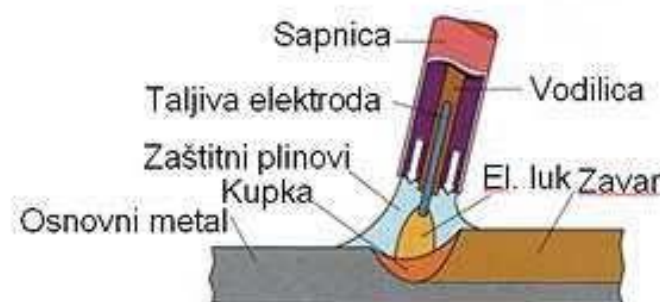
Pri zavarivanju laserom vrlo je teško riješiti dodavanje dodatnog materijala što dodatno otežava sami postupak zavarivanja. Neki od sljedećih zahtjeva koje zahtijeva ova tehnika su oštre tolerancije radnih komada i same pripreme spoja, dok je stupanj iskorištenja dosta nizak.

6. Usporedba laserskog zavarivanja sa ostalim tipovima zavarivanja

Uz lasersko zavarivanje u današnje vrijeme postoji još puno načina zavarivanja određenih materijala. Odabir načina zavarivanja uvelike ovisi o količini i broju serija zavarivanja nekih materijala. Također, dosta ovisi i o svojstvima materijala koji se zavaruju, jer kvaliteta zavara nije ista sa svakom tehnikom zavarivanja i nije potrebna za namijenjeni posao, pa se najčešće odabire ona tehnika koja je iz financijskog aspekta najpristupačnija.

6.1. Usporedba laserskog zavarivanja i MIG/MAG zavarivanja

MIG/MAG zavarivanje je postupak zavarivanja taljivom elektrodom pod zaštitom inertnog/aktivnog plina, a obavlja se ručnim vođenjem plamenika. Kod ovog postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice i radnog komada. Električni luk je intenzivno izbijanje naboja u jako ioniziranoj smjesi plinova i para različitih materijala koje potječu od metala elektrode, obloge, zaštitnih plinova ili praškova. Navedeni proces se odvija u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju inertni plinovi (Ar ili He) ili aktivni plinovi (CO_2 i mješavine). Zaštitni plinovi koji se koriste kod MIG/MAG postupka zavarivanja štite rastaljeni metal od utjecaja okoline atmosfere, te također ionizacijom osiguravaju vodljivi prostor za održavanje električnog luka.



Slika 24. MIG/MAG zavarivanje

Kod gore navedenog postupka najčešće se upotrebljavaju pune žice čiji promjer iznosi 1,0 ili 1,2 milimetra. Osim spomenutih punih žica, nerijetko se koriste i žice koje su punjene praškom. Te žice, prilikom zavarivanja, moguće je koristiti sa ili bez plinske zaštite. Bitno je spomenuti da električni luk tijekom samog postupka zavarivanja mora biti konstantne duljine. Automatska regulacija je ta koja prilikom ovog tipa zavarivanja preuzima konstantnu duljinu električnog luka.

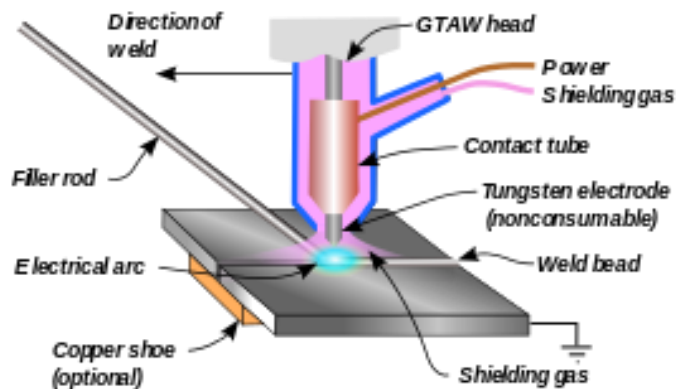
Možemo uočiti da se kod MIG/MAG zavarivanja kao i kod laserskog zavarivanja koriste zaštitni plinovi, koji mogu biti inertni ili aktivni, s ciljem zaštite materijala prilikom zavarivanja od utjecaja okoline atmosfere. Sljedeća zadaća zaštitnih plinova kod MIG/MAG tehnike zavarivanja je osiguravanje vodljivog prostora za održavanje električnog luka ionizacijom, dok to nije slučaj kod zavarivanja laserom budući da se prilikom zavarivanja tom tehnikom ne koristi električni luk. Razliku u navedenim postupcima nalazimo i u financijskom aspektu, naime MIG/MAG postupak je bitno pristupačniji što se tiče cijene jer se oprema koja se koristi kod zavarivanja laserom teže nabavlja, a i dosta je skuplja. Također, kvaliteta zavara uvelike ovisi o vještini i izobrazbi zavarivača tj. čovjeka, dok kod laserskog zavarivanja tu bitnu ulogu preuzima sami stroj. Jako bljeskanje, oslobađanje plinova i štetne posljedice za zdravlje zavarivača neki su od nedostataka koji su izraženi kod MIG/MAG tehnike, a kod tehnike zavarivanja laserom oni nisu prisutni.

6.2. Usporedba laserskog zavarivanja i TIG zavarivanja

TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja gdje se toplinom oslobođenom u električnom luku, koji se uspostavlja između netaljive elektrode i radnog komada, tali osnovni materijal, a po potrebi i dodatni. Dodatni materijal, koji može biti šipka ili žica, dodaje se i tali na rubu taline zavara pod električnim lukom. Mjesta zavarivanja tj., osnovni i dodatni materijal te zagrijani vrh elektrode, štiti se od štetnog djelovanja okolne atmosfere inertnim plinovima. Najčešće upotrebljavani plin za zaštitu je argon. Za TIG zavarivanje potreban je izvor struje, a moguće je koristiti više vrsta struje tj., za različite metale koji se zavaruju koriste se različite elektrode. Prva od mogućih je istosmjerna elektroda (-) pol koja se prvenstveno koristi za zavarivanje svih materijala osim aluminija i magnezija te njihovih legura.

Nadalje imamo istosmjernu elektrodu (+) pol koja se koristi samo u posebnim slučajevima kad je opterećenje elektrode vrlo malo.

Posljedna vrsta struje koja dolazi u obzir je izmjenična ili impulsna struja koja služi za zavarivanje aluminija, magnezija te njihovih legura.



Slika 25. TIG zavarivanje

Elektroda, koja je netaljiva i vrlo bitna za sami TIG postupak zavarivanja, izrađena je od wolframa legiranog s malim dodacima torijevog oksida. Dodaci su prisutni kako bi olakšali uspostavljanje i stabiliziranje luka, te smanjili eroziju vrha elektrode i povećali dozvoljeno strujno opterećenje. Za jače struje potreban je veći promjer elektrode, a za manje struje manji promjer. Vezano za samu elektrodu, bitna je njena priprema neposredno prije početka zavarivanja. Pripremu je potrebno izvesti brušenjem, a poželjna je što finija površina vrha elektrode. Nerijetko se koriste i pomoćne pločice koje se postavljaju na mjestu početka i završetka zavora koje se kasnije uklanjaju, a sve kako bi se spriječile greške prilikom zavarivanja.

Jedna od razlika između TIG postupka zavarivanja i laserskog zavarivanja je u vrsti zaštitnih plinova koji se koriste. Naime, kod TIG tehnike aktivni zaštitni plinovi se ne koriste već samo inertni, dok su kod zavarivanja laserom obe vrste zaštitnih plinova prisutne. Gledajući s financijskog aspekta, TIG je cjenovno pristupačniji od lasera, ali npr. uspoređujući ga s MIG/MAG tehnikom uočavamo da je oprema potrebna za TIG zavarivanje ipak dosta skuplja. Cijena izvora energije je pretežito niska, dok jedini problem u cijeni može nastati kod cijene plina ako nisu optimirani bitni parametri. Kvaliteta zavora još uvijek, kao i kod MIG/MAG, ostaje jako ovisna o vještini i izobrazni zavarivača tj., nije pogodan za automatizaciju što ga uvelike razlikuje od zavarivanja laserom.

Moguće je naravno postići vrlo visoku kvalitetu zavarivanja, samo što bi se trebalo puno više stvari poklopiti kako bi se to ostvarilo. Kod laserskog zavarivanja taj postupak ide dosta brže i ovisan je o puno manje stvari.

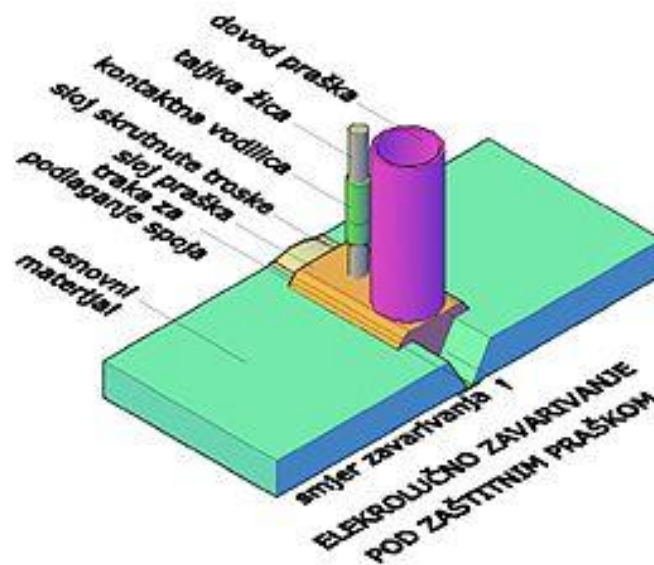
Također, brzina zavarivanja laserom neusporedivo je veća nego što je to kod TIG postupka zavarivanja. Isto tako, prisutno je moguće oslobađanje plina, jako bljeskanje te štetne posljedice za zdravlje zavarivača kao i kod MIG/MAG postupka, koje su za lasersko zavarivanje ipak nepoznat pojam.

6.3. Usporedba laserskog zavarivanja i EPP zavarivanja

EPP tehnika zavarivanja je elektrolučno zavarivanje koje se obavlja pod zaštitom praška. Ovo je prva i jedina tehnika koja koristi prašak za zaštitu materijala i električnog luka. Taj električni luk se održava između kontinuirane taljive elektrode, koja je najčešće u obliku žice, i radnog komada. Neke od daljnjih uloga praška su zaštita rastaljenog metala od štetnog djelovanja okolne atmosfere, sprječavanje naglog hlađenja zavarivanja, te također oblikuje zavar. Postoje razne vrste zaštitnih prašaka, a izbor praška ovisi o vrsti i debljini osnovnog materijala, svojstvima površini lima i parametrima zavarivanja. Kemijski sastav, način proizvodnje, oblik i veličina zrna stvari su po kojima se te razne vrste zavarivanja razlikuju. Prilikom zavarivanja EPP tehnikom često se koristi podloga za zavarivanje, čija je glavna zadaća sprječavanje procurenja taline na korijenskoj strani zavarivanja.

Vrlo bitnu ulogu u načinu rada pri EPP zavarivanju ima električni luk, koji je tijekom zavarivanja potrebno uspostaviti uz pomoć visokofrekventnog generatora. Čim se električni luk uspostavi, visokofrekventni generator se isključuje. Zavar na osnovnom materijalu nastaje taljenjem taljive elektrode tj. žice za zavarivanje koja tijekom procesa stalno dolazi u električni luk.

Ovaj postupak zavarivanja najčešće se koristi kod velikoserijske proizvodnje i kod zavarivanja gdje je potrebno da velika količina osnovnog materijala bude u položenom položaju. Također, nerijetko se koristi i kod zavarivanja debelostijenih posuda i limova.



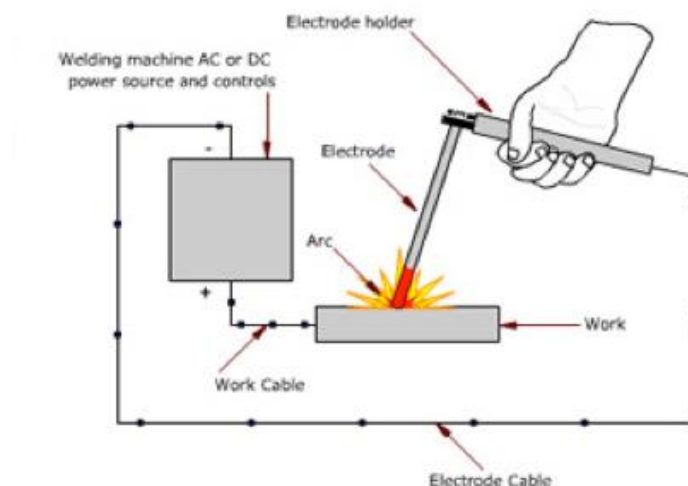
Slika 26. EPP zavarivanje

Od svih prije navedenih tehnika zavarivanja EPP tehnika najbliža je po svojim karakteristikama tehnici laserskog zavarivanja. Sličnost koju lako uočavamo između ova dva postupka je u području automatizacije. Oba procesa moguće je na vrlo jednostavan način automatizirati. Još jedna sličnost na koju nailazimo tiče se same kvalitete zavara. Naime, zavari dobiveni EPP zavarivanjem i laserskim zavarivanjem vrlo su visoke kvalitete i estetski uredni. Bitno je izdvojiti da zavari nastali ovim tehnikama ne ovise o zavarivaču, što znači da bitnu ulogu preuzima stroj.

Jedan od glavnih nedostataka EPP tehnike zavarivanja je povećanje zrna tj. velika talina i sporo hlađenje, dok kod lasera problemi takve vrste ne postoje. Razlika ova dva postupka leži i u tome koje materijale je moguće zavarivati. Materijali, kao što su npr. tanji limovi, nisu pogodni za zavarivanje EPP postupkom dok kod zavarivanja laserom to ne predstavlja problem. Iako je brzina EPP zavarivanja vrlo visoka, ona ipak ne može konkurirati brzini zavarivanja koju postiže laser iz razloga što kod lasera nema taljenja elektrode koja oduzima dosta vremena. Što se tiče pogleda sa financijskog aspekta, EPP zavarivanje je skuplje od ostalih tehnika zavarivanja, ali ne i od laserskog zavarivanja koji ipak prednjači u tom segmentu.

6.4. Usporedba laserskog zavarivanja i REL zavarivanja

REL postupak zavarivanja je postupak ručnog elektrolučnog zavarivanja uz pomoć obloženih elektroda. Energija potrebna za zavarivanje dobiva se iz električnog luka. Raspoloživa električna energija koju crpimo iz mreže sama nije dostatna za snabdjevanje električnog luka energijom, iz toga razloga nam je za uspješno zavarivanje ovom tehnikom potreban izvor struje. Električni luk moguće je održavati bilo izmjeničnom, bilo istosmjernom strujom. Elektroda koja se koristi prilikom REL postupka zavarivanja su obložene, tj. elektroda je metalna jezgra u obliku žice na koju je nanesena nemetalna obloga. Obloga na elektrodi ima razne uloge koje vrši, a dijele se na električnu, fizikalnu i metaluršku funkciju. Električna funkcija elektrode sastoji se prvenstveno u tome da osigurava dobro uspostavljanje luka i stabilan električni luk. Fizikalna funkcija odnosi se ponajprije na omogućivanje i olakšavanje zavarivanja u prisilnom položaju, dok se metalurška funkcija veže za metalurško djelovanje na zavareni spoj u toku samog procesa zavarivanja. Legiranje, dezoksidacija i rafinacija tri su načina metalurškog djelovanja.



Slika 27. REL postupak zavarivanja

Izbor elektroda koje su najpogodnije za REL postupak zavarivanja vrši se prema više različitih kriterija. Najvažniji među njima su kriteriji koje postavlja osnovni materijal, tj. izbor ovisi o mehaničkim svojstvima te kemijskom sastavu osnovnog materijala. Također, zahtjevi koji se postavljaju na zavareni spoj vrlo je bitan faktor koji je potrebno ispuniti kako bi se odabrala elektroda koja najbolje odgovara navedenom postupku. Položaj u kojem se najlakše i najčešće zavaruje REL postupkom zavarivanja je položeni položaj.

Za dobivanje zavarenog spoja ručnim elektrolučnim zavarivanjem potrebno je ponajprije uspostaviti električni luk, u ovom slučaju kratkim spojem tj. kresanjem elektrode o radni komad. Nakon uspješnog uspostavljanja električnog luka, zavarivač kreće s ravnomjernim dodavanjem elektrode u električni luk, te se elektroda počinje taliti.

Između REL postupka zavarivanja i zavarivanja laserom postoje mnoge lako uočljive razlike. Jedine prednosti REL postupka leže u vrlo jednostvanom rukovanju opremom i pogodni su za rad na terenu, što znači da je potrebnu opremu moguće prispojiti na agregat. Isto tako, vezano za cijenu i troškove, oprema za REL zavarivanje puno je jeftinija i lakše ju je nabaviti. Jeftinija ne samo od opreme za lasersko zavarivanje nego i od opreme potrebne za sve ostale tehnike zavarivanja.



Slika 28. Oprema za zavarivanje

Jedna od stvari u kojima lasersko zavarivanje prednjači je definitivno brzina zavarivanja. Nemjerljivo je veća i brzina zavarivanja i produktivnost koja je kod ručnog elektrolučnog zavarivanja vrlo niska. Također, kvaliteta zavara je neusporedivo bolja korištenjem lasera iz razloga što kod REL-a velikim dijelom ona ovisi o iskustvu i izobrazbi zavarivača, a već smo ustanovili da kod laserskog zavarivanja to nije slučaj.

Neki od nedostataka REL zavarivanja u odnosu na lasersko su i bljeskanje pri zavarivanju, otpuštanje štetnih plinova, potrebno čišćenje troske nakon zavarivanja i nemoguće je izbjeći otpad elektrode koji nerijetko seže i do 10 % ukupne elektrode.

6.5. Usporedba laserskog zavarivanja i plinskog zavarivanja

Plinsko zavarivanje je postupak koji pripada postupcima zavarivanja taljenjem. Ovaj postupak jedan je od najstarijih postupaka zavarivanja i danas se koristi sve manje u svijetu zavarivanja. Razvile su se brojne druge modernije tehnike s kojima se plinsko zavarivanje u skoro svim segmentima jednostavno ne može nositi. Toplinska energija potrebna za uspješno dobiveni zavareni spoj dolazi iz kemijske energije koja je vezana u gorivu i koja se oslobađa izgaranjem u plinskom plamenu. Manje bitno je koji se gorivi plin upotrebljava sve dok je prisutan kisik koji omogućava gorenje, a najčešće se ipak koristi plin acetilen (C_2H_2) zatim propan, butan, vodik te zemni plin. Potrebno je kisik u boci stlačiti na 150 bara, a gorivi plin na 15 bara. Neutralni (normalni), reducirajući (višak gorivog plina) i oksidirajući (višak kisika) tri su vrste plamena koje je moguće ostvariti. Postoje dvije tehnika rada tijekom plinskog zavarivanja. Zavarivanje lijevom tehnikom, koja se najčešće koristi za zavarivanje tanjih limova, te zavarivanje desnom tehnikom za uglavnom zavarivanje debljih limova. Zavarivanjem desnom tehnikom troši se više energije, pa je to jedan od razloga zašto je ova tehnika pogodnija za deblje limove.

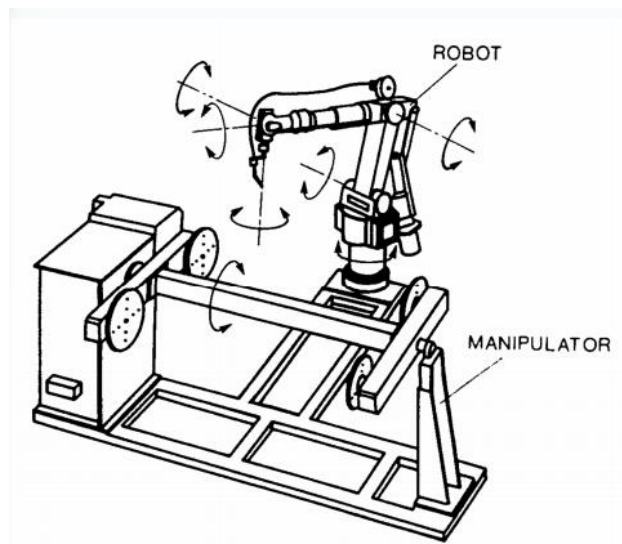


Slika 29. Oprema za plinsko zavarivanje

Plinsko zavarivanje i lasersko zavarivanje dvije su skoro pa neusporedive tehnike zavarivanja. Plinsko zavarivanje spada u tehnike koje su se prve počele koristiti u svijetu zavarivanja. S druge strane lasersko zavarivanje predstavlja moderno doba zavarivanja s puno karakteristika i mogućnosti koje nisu bili niti ostvarive u vremenima kada je plinsko zavarivanje bilo na vrhuncu svoga djelovanja. U ovo naše današnje vrijeme malo tko uopće zavaruje uz pomoć plinskog zavarivanja, isto tako malo se tko još može pohvaliti da je sposoban koristiti svu opremu koja je potrebna za plinsko zavarivanje, osim naravno iskusnih i davno izučenih zavarivača. Brzina zavarivanja, kvaliteta zavarenog spoja, automatizacija, produktivnost daleko su na strani zavarivanja laserom. Naravno, moguće je postići i visoku kvalitetu zavara i plinskim zavarivanjem ako sudjeluje iskusan i visoko obrazovan zavarivač. Jedino u čemu prednost ima plinsko zavarivanje je cijena. Opremu je moguće jeftinije nabaviti, ali kad se sve stvari i obilježja uzmu u obzir ipak prednost ide na stranu lasera. Ekonomičniji je i za dugotrajno zavarivanje pogodnija metoda zavarivanja.

6.6. Robotizirano laserko zavarivanje

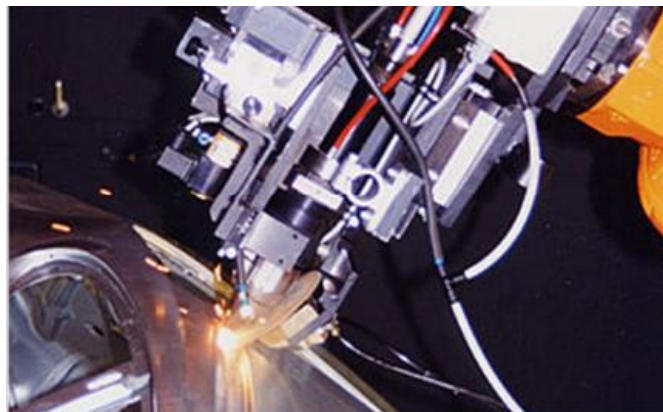
Roboti i njihova pomoć pri zavarivanju uvedeni su postupno u industrijsku proizvodnju iz razloga što su bili namijenjeni za odrađivanje 4D poslova. Glavni motiv u svemu tome bio je ostvarivanje profita zbog vrhunsko odrađivanog zavarivanja robota. Roboti posjeduju određene velike značajke da bi funkcionirali i zavarivali na željeni način. Prije svega, moraju biti isprogramirani jer su roboti mehanizmi koji rade bez pomoći čovjeka tj. moraju biti automatični, kako bi radili i obavljali zadatke bez pomoći čovjeka, te najbitnije multifunkcionalni iz razloga što zbog profita moraju obavljati različite zadatke. Kako tehnologija svakodnevno napreduje tako se i roboti razvijaju i dobivaju sve više slobode pri donošenju nekih odluka u neizvjesnim situacijama. Tako roboti treće i zadnje generacije posjeduju umjetnu inteligenciju i kao takvi oni su sposobni razdvojiti proces prikupljanja informacija i donošenja odluka do kasnijeg kretanja kojim se te odluke provode. Komplikiranost zadatka koji robot može obaviti ovisi o broju stupnjeva slobode gibanja, odnosno o broju slobodnih mogućih nezavisnih kretanja i to se smatra jednim od krucijalnih pojmova u robotici. Broj stupnjeva slobode današnjih robota iznosi šest, za većim broje trenutno nema potrebno, a i košta. Usporedbe radi, ljudska ruka ima 32 stupnja slobode, što se čini jako puno.



Slika 30. Stupnjevi slobode robota

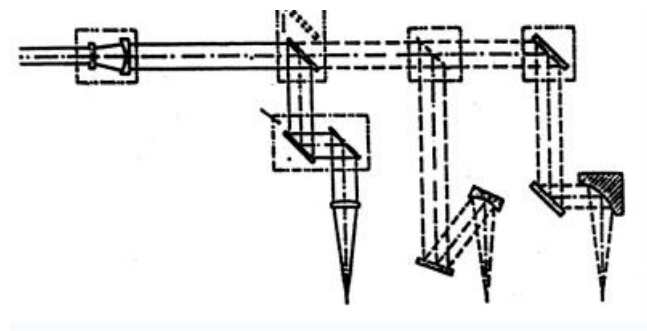
Poznate su tri vrste pogona robota. Prvi i najjeftiniji od njih je pneumatski pogon, slijedi hidraulički gdje se koristi najveća snaga i na kraju električni pogon koji se danas najčešće koristi na području robotike. Roboti u svijetu zavarivanja moraju neophodno imati mogućnost zavarivanja po pravcu, zavarivanja po kružnici, višeslojnog zavarivanja, njihanja električnog luka, on-line programiranja te pohranjivanja programa na medij. Roboti za zavarivanje imaju točnost od 0,02 mm, što je i više nego dovoljno.

Lasersko zavarivanje samo je jedna od tehnika koja se isplati tj., koju ima smisla robotizirati. Također je i tehnika koja se najčešće robotizira iz raznih razloga. Takvim povezivanjem postiže se najveća ekonomičnost i produktivnost u zavarivanju. Nerijetko se roboti i laseri povezuju u tzv. sustav laser-robot. Glavni cilj takvog povezivanja je povećanje fleksibilnosti i zbog 3D obrade.

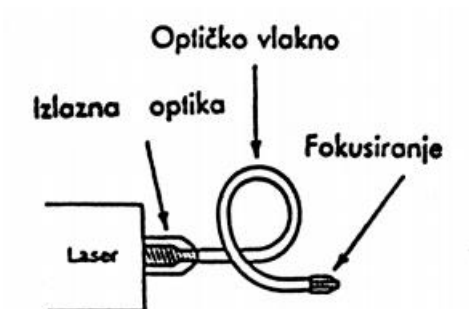


Slika 31. Robotizirano lasersko zavarivanje

Dva takva sustava koja iskaču iz većine definitivno su Nd-YAG laser-robot i CO₂ laser-robot. Vođenje laserske zrake kod Nd-YAG laser-robot izводи se optičkim vlaknom, dok kod CO₂ laser-robot postoje dva načina. Prvi od spomenutih načina je vanjsko vođenje laserske zrake, a postoji također i unutrašnje vođenje zrake. Vođenje laserske zrake kod CO₂ laser-robot obavlja se uz pomoć zrcala.



Slika 32. Vođenje laserske zrake zrcalima



Slika 33. Optičko vođenje laserske zrake

Oba navedena sustava imaju svojih prednosti kao i nedostataka. 3D obrada i programiranje su za CO₂ sustav vrlo teško izvedivi, dok za Nd-YAG sustav u tom području problem ne postoji i vrlo je jednostavno to izvesti. Također, CO₂ sustav zahtijeva puno veću snagu u izvedbi, koja je dosta komplicirana, a sigurnost rada s njim je dosta manja nego što je to slučaj kod Nd-YAG sustava. Bitno je još izdvojiti pogled sa financijskog aspekta, naime postoji razlika u cijeni ova dva laser-robot sustava. Cijenom po kW je CO₂ laser-robot pristupačniji i iz toga razloga nešto češće korišten.

7. Zaključak

Lasersko zavarivanje je u današnje vrijeme prisutno u mnogobrojnim granama industrije u svijetu. Također, ova tehnika prisutna je i u općoj i osobnoj primjeni i možemo reći da se nalazi svugdje oko nas. Ovakav tip zavarivanja ima više prednosti u odnosu na ostale tipove tehnika zavarivanja. Najčešći je tip zavarivanja koji se koristi danas baš zbog brojnih svojih prednosti u odnosu na ostale tehnike zavarivanja. Unatoč brojnim prednostima laserskog zavarivanja, sagledano sa financijskog aspekta, nailazimo na otpor. Naime, troškovi koje je potrebno podmiriti iznimno su visoki, koji naravno prvenstveno ovise o tipu primjene, te je također vrlo neprihvatljivo za maloserijsku proizvodnju. To se nameće kao jedan od glavnih razloga zašto ova lasersko zavarivanje nije još više korišteno.

Ako je glavni cilj dobiti proizvod visokog stupnja kvalitete s preciznim zavarom, a uz to ostvariti i visoku fleksibilnost i produktivnost, ovaj tip zavarivanja je najpogodniji za korištenje. Između ostalog, lasersko zavarivanje postiže veću brzinu zavarivanja u odnosu na ostale tehnike, a ta brzina doseže čak 10 m/min. Budući da je stupanj deformacije materijala kod zavarivanja laserom vrlo mala, ono je posebno pogodno i za zavarivanje tankostijenih konstrukcija.

Unatoč svim prednostima laserskog zavarivanja, naravno postoji još puno prostora za napredak istog. Uz neprestani razvoj novih tehnologija u svijetu i konstantan razvoj opreme potrebne za zavarivanje laserom, na temelju dosadašnjeg iskustva, moguće je očekivati još inovativniju, napredniju i isplativiju tehniku laserkog zavarivanja. Što znači, precizniji i kvalitetniji dobiveni zavari. Uz sve to, potreban je visokoobrazovan kadar ljudi koji su sposobni izvesti pripadajući stroj, kako bi on bio u stanju precizno pozicionirati radni komad.

Iz mnogobrojno navedenih primjera može se zaključiti da lasersko zavarivanje ima više prednosti nego nedostataka, te je najisplativija tehnika zavarivanja za dugoročnu proizvodnju. Iz navedenih razloga, također je vrlo pogodna tehnika za različite grane industrije, medicinu i svijet znanosti, naravno uz uvjet da se koriste na odgovarajući način prikladan za tehniku zavarivanja laserom.

8.Literatura

- 1.) <http://www.znanje.org/i/i22/02s/LASERI/uvod.htm>
- 2.) https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_laserskim_snopom
- 3.) LASER (fizikalne osnove, konstrukcija i primjena) dr. Stjepan Lugomer, mr. Mladen Stipančić („svjetlost“ - Sarajevo, 1977.godine)
- 4.) T. Ban, Femtosekundni laseri – preciznost u vremenu i frekvenciji, Matematičko-fizički list LVIII 2 (2007.-2008.)
- 5.) <http://www.infotrend.hr/clanak/2009/5/3d-lasersko-skeniranje,38,785.html>
- 6.) <http://www.laser-ing.hr/blog/lasersko-rezanje-prednosti-i-karakteristike>
- 7.) <http://znano.st/znanost-matematika-fizika-kemija/4/bolji-laseri-za-opticku-komunikaciju/124>
- 8.) LASERI: Bruna Babić, Sibil Brinjak
- 9.) https://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno_elektrolu%C4%8Dno_zavarivanje
- 10.) https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_MIG_postupkom
- 11.) Bilješke sa predavanja na stručnom studiju strojarstva u Karlovcu 2016.godine

Slike:

- Slika 11. <http://www.znanje.org/i/i22/02s/LASERI/plinski.htm>
- Slika 13. <http://jacobsschool.ucsd.edu/cosmos/2016/cluster5/lectures/Lec5.pdf>
- Slika 15. <https://informatika.buzdo.com/s205-pisac-racunala.htm>
- Slika 17. <http://www.infotrend.hr/clanak/2009/5/3d-lasersko-skeniranje,38,785.html>
- Slika 19. https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/talj_prit.html
- Slika 24. <https://www.alurvs.nl/roestvast-staal/artikellijst/7906/>
- Slika 25. https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1479732820-0-postupcispajanja_materijalilaseri-bauer.pdf

Slika 26.

http://www.designforlasermanufacture.com/26/thick_section_keyhole_welds.html

Slika 27.

https://www.google.hr/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKEwj-ofHt_bzdAhUE3aQKHR9KDGEQjRx6BAgBEAQ&url=http%3A%2F%2Fss-tehnicka-ri.skole.hr%2Fdokumenti%3Fdm_document_id%3D491%26dm_dnl%3D1&psig=AOvVaw10RGxdl3VO6-wvQ8aDJkTb&ust=1537099997660144

Slika 30. <http://www.weldoninternational.com/hr/rucno-elektrolucno-zavarivanje/>

Slika 31. <http://www.ram-rijeka.com/c/1189/Brzi--slikovni--preglednik-proizvoda-za-plinsko-rezanje-i-zavarivanje-kao-i-zastitne-opreme-za-ovu-djelatnost---Ram-rijeka.wshtml>